

汽轮发电机组轴系扭振研究的发展与展望

余颖辉 张保会

(西安交通大学电力系 710049 西安)

摘 要 自从汽轮机组轴系扭振问题被提出以来,国内外对此进行了广泛而深入的研究并取得了大量成果。在参阅近年来国内外文献的基础上,就轴系扭振产生原因、相应分析方法及解决措施进行了总结,分析了目前研究中尚待解决的问题,并结合目前电力工业中新型输配电、继电保护及控制等技术的发展需要,提出了一些新的研究方向以供参考。

关键词 汽轮发电机 轴系扭振 次同步谐振 大扰动

分类号 TM 311 TM 712

0 引言

随着现代电力工业的发展,汽轮发电机组的功率迅猛增长,轴系变得相对细长,提出了机组扭振问题,同时输电系统的大容量化、长距离化,电力系统结构的复杂化,电力负荷的多样化以及新型输配电和控制技术的应用都有可能对轴系产生很大的影响,诱发各种扭振、共振,国内外已经发生多起扭振造成机组重大损坏的事故。

随着轴系扭振问题的日益突出,国内外对此展开了广泛而深入的研究。本文重点参阅了近 10 年来国内外发表的关于轴系扭振问题的文献,结合发生的事故,就扭振产生原因、相应分析方法及解决措施进行了总结,并指出了研究中尚待解决的问题及一些新的研究方向。

1 轴系扭振的起因

汽轮发电机组轴系扭振是指在发生机电扰动时,汽轮机驱动转矩与发电机电磁制动转矩之间失去平衡,使轴系这个弹性质量系统产生一种运动形式——扭转振动^[1]。引起扭振的原因来自两方面:机械扰动与电气扰动。前者主要指不适当的进汽方式、调速系统晃动、快控汽门等。后者一般根据大小分为两类:一类是由串联电容补偿所引起的次同步谐振(SSR)及有源电力设备及其控制系统(HVDC, PSS, SVC 等)引起的次同步振荡(SSO)(目前的研究对两者不作严格的区分);另一类是指各种急剧扰动,如短路、自动重合闸、误并列、甩负荷等。

2 电力系统次同步谐振分析

自从 70 年代初,美国 Mohave 火电站的一台

790 MW 机组在不到一年的时间里先后发生两起大轴破坏事故以来,又相继出现了加拿大某机组在投入电力系统稳定器后扭振振幅不断增加,美国第一条可控硅控制的直流输电系统在送端切除交流输电线后送电时发生了次同步谐振等事故^[2,3]。针对这些事故,以 IEEE 的 SSR 工作小组为代表的许多机构、学者开展了关于次同步谐振对轴系扭振影响的研究,并取得了很大的成果^[1,4,5]。这些研究主要集中在以下 3 个方面。

2.1 轴系建模

轴系建模是进行轴系扭振分析的基础,其精确性和简单实用性将大大提高研究效率和研究结果的可信度。目前有 3 种用于扭振分析的轴系模型:第 1 种是以 4 个~7 个集中惯性体和连接它们的理想弹簧所组成的简单质量-弹簧模型,这种模型对于频率较低的扭振模态具有一定的精度,因此在 SSR 分析中应用较普遍。第 2 种是基于连续介质理论,采用有限元方法建立的连续质量模型(也称分布质量模型),采用偏微分方程形式,可用数值方法求解,能准确计算较高阶扭振特性,但计算量大,且易造成较大的累积误差,不适于求解机电耦合系统状态方程组。第 3 种是多段集中质量模型,本质上与简单质量模型相同,但是可根据轴系的结构特点使分段数依分析需要由几十段到几百段不等。它既可以求取简单质量模型所无法确定的高阶扭振固有频率,又避免了采用连续质量模型计算时所需的庞大计算量,因此得到了广泛的应用。

在目前的系统仿真及扭力矩计算中,为了在保证一定的计算精度的同时又能减小计算量,通常要对轴系模型进行处理。主要有两种方法:对精确的高阶质量-弹簧模型进行离散、降阶处理;在给定模型的结构或阶数的前提下,利用轴系运行或实验数据

进行参数辨识。

对于模型降阶,国内外提出了许多方法。文献[6]提出了采用模态解耦集结法降阶,只截取所关心的扭振频率较低的模态。该文作者采用二分法、逆迭代法求取部分特征值和特征向量,大大减少了计算量。该文还提出了一种基于振型拟合的降阶方法,利用已知的原始模型的参数及扭振模态的频率和振型,在保持所关心模态部分的频率和振型精度的情况下,将轴系的各质量块从一端向另一端逐个集结,并求出等效的刚度系数。但由于求解过程中,等效刚度系数是在满足某一模式频率、振型时求出的,故其精确度难以保证。

文献[7]按电气网络端口效应的等效原则提出了一种星-三角变换降阶法,将高阶质量-弹簧模型转化为等值的 $L-C$ 电路模型,然后运用“星-三角变换”理论进行化简,通过机电类比建立低阶模型。

以上几种降阶法虽然能使降阶后模型的扭振频率、振型和原高阶精确模型对应的扭振模态近似一致,但未能保留原模型的输入-输出特性,故它们可用于 SSR 分析,而不适宜于电力系统大扰动引起的暂态扭力矩分析。针对暂态扭力矩分析,文献[8]提出了平衡降阶法和最优 Hankel 范数降阶法。前者基于平衡实现保留原高阶模型中可控、可观程度较强的部分;而后者则尽可能保留原高阶模型的输入-输出频率响应特性,与仅保留高阶模型主导扭振模式的建模方法相比,更适合于暂态扭力矩分析和轴系疲劳寿命研究。

参数辨识法是另一类轴系建模途径。它基于最小二乘法和轨迹灵敏度理论,对给定阶数的轴系模型进行刚性系数和惯性系数的辨识,从而建立合适的轴系模型。文献[9]在给定轴系模型结构的前提下,采用参数辨识法,通过分析扭振角频率 ω 对刚度系数 K 和惯性系数 T_J 的灵敏度 $\frac{\partial \omega}{\partial K}, \frac{\partial \omega}{\partial T_J}$,逐步调整刚度系数,使降阶模型的扭振频率更接近于准确值。这种方法的缺点在于,当模型参数与实际参数偏离较大时,不能保证参数识别迭代过程的一致收敛性,而且这种方法需要大量的实测数据。

归纳目前的轴系建模方法,主要有以下问题有待解决:对于降阶模型,难以确定合适的阶数以便定性或定量地进行分析;未能很好地考虑参数摄动及阻尼系数对轴系模型的影响。

2.2 次同步谐振的分析方法

根据 IEEE 的 SSR 工作小组的定义^[1],次同步谐振是电力系统的一种状态,即电网在低于系统同步频率的一个或几个频率下与汽轮发电机进行能量

交换。目前电力系统次同步谐振的分析方法主要有 3 种:频域扫描法,复力矩系数分析法和特征值分析法。

用频域扫描法^[10]进行 SSR 分析时,以小扰动分析为基础,从欲研究的机组的机端看进去,得到与频率相关的系统的等效阻抗 $Z(j\omega)$,利用它和机组机械部分参数来分析是否存在 SSR。这种方法考虑较为周全,故在复杂系统 SSR 分析中得到了应用^[11],但由于它将电气系统与机械系统分开考虑,忽略了两者的相互作用,故结果的精度受到了影响。

复力矩分析法^[12]提出了电磁力矩与机械扭矩的等效阻尼系数的概念,并通过比较两者的正负与大小,来判断是否发生次同步谐振,其优点是较详细地考虑了机电系统各部分的动态特性且概念清晰。在此基础上,文献[13]提出了复频域等效端口导纳矩阵 (complex frequency domain port-equivalent conductance matrix,缩写为 CPCPM) 的概念,并采用分散消元法,将复力矩系数法推广应用到任意网络结构下多机交直流联合系统 SSR 的研究,使 SSR 的理论研究向工程实用计算推进了一大步。

特征值分析法是另一类重要的 SSR 分析方法。它基于小扰动理论,对线性化后的系统状态方程的系数矩阵进行特征值分析。通过判断特征值实部的正负,来分析是否会发生 SSR。文献[14]用它对带串联电容补偿的简单电力系统进行了的 SSR 分析,效果很好。但用于复杂电力系统的 SSR 分析时,存在系统模型阶数相当高、计算量很大的问题。

文献[15]首次提出了利用李雅普诺夫函数判定简单电力系统轴系扭振稳定性的方法:将轴系分解成若干个子系统,分别构造各子系统的李氏函数,利用各子系统间的关联项得出整个轴系的李氏函数,最后运用李雅普诺夫稳定性理论得出轴系的静稳判据。该方法思路清晰且简单易行,但对多机系统,存在系统难于分解的问题;且由于李氏分解法给出的只是扭振稳定性的充分条件,使稳定域偏于保守。

综上所述,目前 SSR 分析方法存在的主要问题有:

a. 频域分析法因作了大量简化,其精度难以保证,且计算工作量大。

b. 复力矩系数分析法经不断改进,已用于分析实际复杂系统中由 HVDC, SVC 引起的次同步振荡。但它与严格特征值分析法的结果是否一致,目前尚无理论证明。

c. 特征值分析法有严格的理论基础,能较好地解决有串联电容补偿的单机无穷大系统的 SSR 分析问题,但对复杂系统,求解的方程组阶数相当高,

计算量大,且有可能不收敛,这一点有待改进。

3 机网大扰动与轴系扭振

近年来,国内外发生了多起电网大扰动造成的机组轴系扭振事故^[2,3],研究者们开始关注诸如短路故障、重合闸等开关操作、误并列、快关汽阀、甩负荷等大扰动引起的轴系扭矩冲击,主要采用时域仿真方法对这些问题作了研究^[2,16~18],并且编制了一些可用来计算扭振问题的程序。

3.1 短路故障与重合闸

国外在 70 年代就已利用时域仿真方法对短路故障与重合闸操作作了大量研究,认为发电厂近距离(包括发电机机端)两相或三相短路并切除以及非同期并网,将激发轴系扭振,并产生很高的机械交变扭应力,其中 120°非同期并网对机组轴系的影响最严重。

针对快速重合闸(HSR)对轴系的影响,文献[16]通过仿真指出,轴系的累积疲劳损耗随故障类型、地点、故障清除时间和重合闸时间的不同变化很大,认为发电机近端应禁止采用 HSR;对于单相接地及相间故障采用 HSR 是可行的;对于三相故障只能采用延时重合闸,让轴系扭振能在重合于故障线路之前有足够的时间衰减约一半;当发电机仅通过单线与系统连接时,只能采用单相重合闸。

文献[17]利用 Monte Carlo 法模拟了断路器重合操作的概率性,对 HSR、选择性 HSR、顺序重合闸、延时重合闸的运行情况作了比较,指出不成功的重合闸将对轴系产生 4 次冲击,并推荐使用轴系疲劳寿命损耗最小的延时重合闸。

针对不适当的重合闸可能造成较大的轴系疲劳损耗,1982 年美国 IEEE 专门组织工作组对重合闸问题进行了研究并提出报告^[19],建议不要采用三相快速重合闸,而改用三相慢动重合闸或单相重合闸。

自从自适应重合闸被提出以来^[20],关于它的研究、应用一直在不断进行。Billinton 等人^[18]综合考虑了系统实际运行中故障类型、地点、持续时间及重合闸时间的概率分布,用条件概率来估计轴系最大扭矩,指出对于三相故障,同步重合与自适应重合对扭矩的影响差别很大,前者造成的扭矩冲击远大于后者,但对重合成功的情况,两者差别不大;文中还引入了风险系数 R_i 来评价两者引起轴系扭矩超出设计值的可能性,认为前者远大于后者。

近年来,国内也对各种重合闸操作对扭振的影响作了广泛研究。文献[21]在分析计算传统 HSR 引起的轴系扭矩的基础上,基于永久性故障下传统的 HSR 在单相接地时对轴系冲击比三相接地时冲

击小,提出了对三相重合闸“分相重合”的新思想,即先重合其中任意一相,再依次经过相同的时延分别重合另外两相。文中利用 EMTP 程序进行了仿真计算,结论是:对于永久性故障,传统 HSR 会导致轴系扭矩矩放大和发电机摇摆角增大,而分相重合 HSR 则可有效降低对轴系扭振的影响,并大大加强系统运行的稳定性;对于瞬时性故障,分相重合 HSR 的不利影响也非常小。文献最后分析了分相 HSR 在大 型火力发电厂送出线上应用的广阔前景。

随着对自适应重合闸的研究,为了解决我国 220 kV~500 kV 不带并联电抗器的线路上发生故障三相跳开后,线路电压呈直流特性,使自适应单相及三相重合闸应用遇到困难的问题,文献[22]提出了自适应分相重合闸原理。相对于前面提出的分相重合,其自适应体现在:①根据故障选相的结果确定首合相。②判断故障性质,对永久性故障,跳开首合相同时闭锁其他相的重合;对瞬时性故障,待电厂检同步后合闸。作者并通过仿真计算,验证了自适应分相重合闸对除三相永久性接地外的其他故障,重合、跳开首合相均不会导致再一次故障,从而避免了对机组轴系的又一次冲击。

3.2 快关汽门或甩负荷

快关汽门能有效地提高电力系统的暂态稳定性,但电网发生故障实行快关时,将使机组轴系在受到电网剧烈扰动后又经受一次新的冲击。快关对转子的危害程度主要取决于快关前机组所带负荷、快关时序、持续时间及轴系的扭振特性。对国内外这类事故的分析认为轴系的低阶扭转振型对快关或甩负荷比较敏感^[2]。

文献[23]分析了快关时序对轴系扭振的影响,针对某系统,选择出一个较佳快关时序,有效地减小了其扭振的影响,并指出应结合故障类型与具体的系统选择较佳的快关时序。为了克服固定逻辑快关汽门无法适应多种故障的缺点,提出了最优快速汽门控制,研究表明:它对扭振稳定性有很大的影响^[24],其中转速信号的高控制增益会引起轴系不稳定扭振。对于这个问题,文献[24]提出了 3 种解决方法:

- 对转速取较小增益,使系统带宽适当变窄。
- 使用转速滤波器,以降低系统控制性能为代价来保证足够的扭振衰减。
- 采用含扭振信号少的多测点平均转速信号,设计简单,既能避免激励不稳定扭振,又不影响系统的低频响应。

3.3 扭振响应的仿真计算

根据电气量与机械量变化的特点,可以看出电

扰动对轴系扭振的影响比机械扰动严重,因此对电扰动下机网相互作用的仿真计算尤为重要。国内外已开发出一些颇具影响的电磁、机电过程仿真软件,如美国的 BPA-EMTP,德国的 NETOMAC,国内上海交通大学开发的 MANDISP 与 SOFRESP。

电力系统扰动下轴系扭振计算方法通常有两种:一是根据机电系统扭振模型建立全系统耦联动力方程,选择一数值积分方法,求得扭振响应;二是先计算出发电机气隙暂态电磁转矩,将其作为外施扭矩作用到轴系,并求解轴系运动方程,得到扭振响应。由于前一种方法更接近实际,目前多被采用。

通过以上分析,可以看出关于电网大扰动影响轴系扭振问题的研究,还存在以下问题有待解决:

a. 仿真已表明,不同的扰动冲击时刻对扭振的影响不同,但对其影响机理缺乏研究。

b. 不同的电网扰动对轴系冲击的模型有待提出。

c. 国内外研究均认为电网大扰动时序对扭振有较大的影响,那么能否捕捉到一最佳时序,使其后续操作对轴系的冲击最小,而又不会对系统稳定造成危害,这对于机组实际运行很有意义。

4 预防和抑制轴系扭振的措施

自从 1970 年美国 Mohave 电站发生断轴事故以来,针对轴系扭振的起因已经提出了许多预防和抑制措施^[4,20,25,26]。

a. 针对次同步、超同步谐振的主要措施有:改进汽轮机组与电力系统结构,如轴系调频,发电机回路串接电抗,转子磁极加装极面阻尼绕组,加设滤波器和阻尼器;采用控制与调节手段,如励磁调节,采用动态稳定器及 FACTS 器件。

b. 针对电网大扰动引起的冲击性扭振的主要措施有:规定轴系材料的屈服应力 τ_s ,应大于机端两相短路时各轴段的扭应力 $\tau_{\max}$;建议尽量使用单相重合闸,延长三相重合闸时间;对连续性快关、甩负荷的大小及次数应加以适当的限制。

c. 加装保护和监测装置,能有效防止机组出现过大应力和疲劳损坏。

5 扭振问题研究的展望

通过分析国内外关于扭振问题的研究,提出以下尚待解决的问题及一些新的研究方向以供参考:

a. 更有效且精确的轴系模型有待提出。

b. 将现有的 SSR 分析方法加以改进,并应用于实际的复杂电力系统中是今后需要解决的问题。

c. 对调节系统、励磁系统及新兴的 FACTS 器

件对扭振潜在影响的研究有待进一步开展,以便进行改进,消除事故隐患。

d. 进行扭振实测实验对机组轴系设计很有价值,提高实测技术也很有必要。

e. 由于目前关于电网大扰动对轴系影响的研究方法还局限于进行时域仿真,缺乏理论依据,采取的相关对策也相应地较消极,更多的是限制某项操作而不是去改善它。针对这一现状,结合目前关于最佳重合闸及自适应技术取得的成果,提出一个新的研究课题——构造描述电网大扰动对轴系冲击的模型,利用它及现代动力学、控制学理论进一步揭示各种不同性质的扰动对扭振影响的机理,并在此基础上对目前的操作进行有针对性的改善。可以预见这方面的研究成果对机组轴系设计、机组运行及电网操作规程的制订将具有重要意义。

参考文献

- 1 IEEE SSR Working Group. Proposed Terms and Definitions of Subsynchronous Oscillations. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(2): 506~511
- 2 汽轮发电机组扭振研究译文集. 西安热工研究所. 西安: 1986
- 3 许楚镇,张恒涛. 汽轮发电机组轴系扭振事故剖析和技术开发展望. 动力工程, 1990, 10(2): 9~14
- 4 IEEE SSR Working Group. Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1810~1818
- 5 IEEE Committee Report. Reader's Guide to Subsynchronous Resonance. IEEE Trans on PWRs, 1992, 7(1): 150~156
- 6 Yang B, Chen H. Reduced-Order Shaft System Models of Turbogenerators. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8(3): 1366~1374
- 7 Hammons T J. Analysis of Continuum and Reduced Shaft Models in Evaluating Turbine-Generator Shaft Torsional Response Following Disturbances on the System Supply. Electric Machines and Power Systems, 1987, 13: 387~408
- 8 陈建福. 汽轮机组轴系扭振模型降阶及多机系统次同步谐振选择模式分析方法; [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1993
- 9 龚乐年,陈月亮. 汽轮机组轴系模型降阶处理和分析. 见: 电力系统与电网技术年会论文集. 北京: 1989
- 10 Kilgore L A, Ramey D G, Hall M C. Simplified Transmission and Generation System Analysis Procedures for Subsynchronous Resonance Problems. IEEE Trans on PAS, 1977, 96(6): 1840~1846
- 11 Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论. 李永庄,林集明,曾昭华译. 北京: 水利电力出版社, 1991. 265~268

- 12 Canay I M. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electric Damping of the Synchronous Machine. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(10): 3630~3638
- 13 吴俊勇,陈晓华,汪馥英,等. 复杂电力系统发电机轴系扭振特性的快速计算. 电力系统自动化,1997,21(4): 6~8
- 14 Larsen E V, Baker D H. Series Compensation Operating Limits——A New Concept for Sub-synchronous Resonance Stability Analysis. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5): 1855~1863
- 15 吴俊勇,程时杰,陈德树. 用李雅普诺夫函数法判定汽轮发电机组轴系扭振的稳定性. 电力系统自动化,1997,21(7): 42~44
- 16 Joyce J S, Kulig T, Lambrecht D. The Impact of High Speed Reclosure of Single and Multi-Phase System Faults on Turbine Generator Shaft Torsional Fatigue. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(1)
- 17 Bowler C E J, Brown P G, Walker D N. Evaluation of the Effect of Power Circuit Breaker Reclosing Practices on Turbine-Generator Shafts. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(5)
- 18 Aboreshaid S, Billinton R, Faried S O. Effect of Adaptive Single-Pole Reclosing on the Stochastic Behavior of Turbine-Generator Shaft Torsional Torques. IEEE Trans on EC, 1998, 13(2): 133~139
- 19 IEEE Working Group on the Effect of Switching on Turbine-Generators. Effect of Switching Network Disturbances on Turbine-Generator Shaft Systems. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(2): 3151~3157
- 20 Thorp J S, Horowitz S H, Phadke A G. The Application of an Adaptive Technology to Power System Protection and Control. In: CIGRE Report. Paris: 1988
- 21 袁越,张保会,葛耀中. 分相重合对轴系扭振和系统运行稳定性的影响研究. 西安交通大学学报,1996,30(3): 87~93
- 22 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安: 西安交通大学出版社,1996
- 23 袁越,葛耀中,张保会. 自适应分相重合闸对机组轴系扭振和系统暂态稳定影响的研究. 电力系统自动化,1997,21(5): 19~22
- 24 陈钰,戴克健,杨昆. 汽轮发电机汽门快关时序对系统暂态稳定性及轴系扭振的影响. 见:全国高等学校电力系统及其自动化专业第9届学术年会论文集(中). 重庆:重庆大学出版社,1993. C001~C007
- 25 鲍文,于达仁,夏松波. 最优快速汽门控制对大型汽轮发电机组轴系扭振稳定性的影响. 电力系统自动化,1998,22(1): 18~21
- 26 Patil K V, Senthil J, Jiang J, et al. Application of STATCOM for Damping Torsional Oscillations in Series Compensation AC Systems. IEEE Trans on EC, 1998, 13(3): 237~243

余颖辉,女,1976年生,硕士研究生,从事电力系统稳定控制的研究。

张保会,男,1953年生,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定控制、继电保护及配电网综合自动化的研究。

DEVELOPMENT AND PROSPECT OF RESEARCH ON TURBINE-GENERATOR SHAFT TORSIONAL OSCILLATION

Yu Yinghui, Zhang Baohui (Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)

Abstract Since the problem of shaft torsional oscillation is taken into consideration, comprehensive research has been conducted and great achievements have been gained. On the basis of recently published documents, this paper makes an overview of the reasons, corresponding analysis methods and countermeasures for shaft torsional oscillation. The deficiencies in present research are pointed out. In the end, some new development trends combined with the newly developed transmission, distribution, relay protection and control techniques in power system, are discussed.

Keywords turbine-generator shaft torsional oscillation subsynchronous resonance great disturbance